Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 3, Fall 2022, p. 331-349

Investigating the Effect of Output Flow Regulator Plate on the Performance of Flour Cyclone: Experimental Studies and Numerical Simulations

E. Aghaei Badelbou[1], V. Rostampour[1*], A. Rezvanivand fanaei[1], A. M. Nikbakht[1]

1- Department of Mechanic of Biosystem Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: V.rostampour@urmia.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.2021.67389.1000

Received: 04-12-2020 Revised: 10-04-2021 Accepted: 14-04-2021 Available Online: 14-04-2021	**How to cite this article:** Aghaei Badelbou, E., V. Rostampour, A. Rezvanivand fanaei, and A. M. Nikbakht. 2022. Investigating the Effect of Output Flow Regulator Plate on the Performance of Flour Cyclone: Experimental Studies and Numerical Simulations. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 331-349. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.2021.67389.1000

Introduction

Cyclone separators use the centrifugal force generated by the gas flow stream to separate the particles from their carrier gas. Simple design, low capital, and easy maintenance make them ideal for use as a valuable pre-refining or sedimentation device. The cause of the particles moving towards the wall and separating from the fluid phase is the centrifugal force created by the rotational flow in a cyclone.

Computational fluid dynamics (CFD) is one of the most well-known and widely used advanced modeling methods used for a variety of applications, including separation processes, thermal processes such as dryers, as well as a wide range of engineering and agricultural applications. The numerical solution of Navier-Stokes equations is the basis of all CFD techniques, which is the result of the rapid progress of computers and a deep understanding of the numerical solution of turbulence phenomena.

Materials and Methods

The measurement system of experimental data includes a cyclone separator, feeder, piping, and fan. Measurements of velocity and pressure were carried out using a hot wire air flow rate, (Model 8465-TSI with a resolution of 0.07 $m.s^{-1}$ and a working range of 0.125 to 150 $m.s^{-1}$), as well as a differential pressure gauge (CPE310s- KIMO, with an accuracy of 0.1 Pa), respectively. To investigate the effect of the output flow regulator plate on the cyclone performance, five different positions in addition to the base position (zero degree angle or fully open) including angles of 15, 30, 45, 60, and 75 degrees were evaluated.

The conservation laws governing the various flows and geometries in the CFD include the conservation law of mass, conservation law of momentum, and conservation law of energy.

According to the Mach number value, the pressure base solver was selected. Also, the Reynolds stress model (RSM) was applied to model the flow turbulence. In the discrete phase model (DPM), the fluid phase is solved continuously by solving averaged time equations, while the dispersed phase is calculated by tracing a large number of particles through the flow field.

The boundary conditions used in this study include the inlet velocity boundary condition at the inlet of the cyclone, the outlet pressure boundary condition in the upper and lower outlet sections, and the non-slip wall boundary condition for other surfaces. The particle collision to the wall was also defined as reflective. In the mesh section of the cyclone simulation, five mesh levels were used to check the mesh independence test. The numbers of mesh cells in the five levels were 196810, 283120, 427890, 634940, and 1045290. The selected mesh was 427890 level regarding time consideration.

Results and Discussion

In the first section, the validation of simulation results with experimental results is discussed. The value of the velocity magnitude decreased with increasing the angle of the plate, which is probably due to the reduction of the inlet level as well as the reduction of the exhaust airflow in the cyclone air outlet.

The maximum value of velocity magnitude occurred according to the direction of the air inlet in the cyclone inlet, which is gradually reduced due to the rotational motion inside the cyclone.

The collection efficiency in the cyclone at different levels of regulating plate has values of 85.1% to 95.3%, with maximum collection efficiency at 30° which was 95.3%. The turbulent intensity contours show that turbulence intensity decreases to an angle of 30 °, and then reaches an almost constant value for the 30, 45, and

60 ° angles.

Conclusion

As the angle of the output current regulator plate increased, the magnitude of velocity decreased significantly.

The separation efficiency showed an increasing-decreasing trend for different values of the regulator plate such that up to a 30° angle of the plate had a positive effect on the separation efficiency.

In general, considering the compromise between separation efficiency and pressure drop as two key parameters affecting the performance of the cyclone, an angle of 30 degrees was selected as the best angle among the studied angles for application.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Pressure drop, Separation efficiency, Turbulent intensity

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۳۴۹-۳۳۱

بررسی تاثیر صفحه تنظیم‌کننده جریان خروجی بر عملکرد سیکلون آرد: مطالعات تجربی و شبیه‌سازی عددی

احسان آقایی بدلبو[۱]، وحید رستم‌پور[۲]*، عادل رضوانی‌وند فنائی[۳]، علی محمد نیکبخت[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۵

چکیده

سیکلون‌ها با توجه به هزینه‌های ساخت و نگهداری نسبتاً پایین و سادگی آن‌ها همواره در صنعت و کشاورزی مورد توجه بوده‌اند. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یکی از ابزارهای توانمند برای پیش‌بینی رفتار در شرایط مختلف است که با حل عددی معادلات ناویر- استوکس درک بهتری از حل عددی در شرایط آشفتگی جریان سیال می‌دهد. در این مطالعه تأثیر صفحه تنظیم جریان مکشی در یک سیکلون مورد استفاده در صنعت آرد، بر روی جریان‌های داخلی در داخل سیکلون مورد بررسی قرار گرفته است. از نرم‌افزار گمبیت و نرم‌افزار انسیس فلوئنت نسخه‌ی ۱۵ به‌ترتیب برای رسم هندسه مسئله، ایجاد شبکه، اعمال شرایط مرزی و هم‌چنین برای حل معادلات بقا بهره گرفته شد. از مدل آشفتگی تنش‌های رینولدز RSM برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان داخل سیکلون استفاده گردید. لازم به ذکر است که با توجه به رقیق بودن جریان آرد در داخل جریان هوای حامل از مدل فاز گسسته (DPM) برای ردیابی ذرات از طریق میدان جریان استفاده گردیده است. در زوایای صفحه صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه، پارامترهای اندازه سرعت، سرعت محوری، بازده جمع‌آوری، افت فشار، ضریب اصطکاک سطح و هم‌چنین شدت آشفتگی با جزئیات استخراج گردیده و در قالب کانتورهای هم‌ارز شده با شاخص یکسان، با یکدیگر مقایسه شدند. علاوه بر این برای درک هرچه بیش‌تر رفتار جریان، کانتورهای مربوط به مسیر حرکت برای سیکلون استخراج گردیدند. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن تمامی شرایط، زاویه صفحه تنظیم‌کننده ۳۰ درجه با افت فشار ۱۳۴/۲ پاسکال و بازده جمع‌آوری ۹۵/۳ درصد دارای بهترین شرایط در بین حالت‌های مورد بررسی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: افت فشار، بازده جداسازی، دینامیک سیالات محاسباتی، شدت آشفتگی

مقدمه

عملیات جداسازی در صنعت و کشاورزی همواره از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. سیکلون‌های جداکننده از نیروی گریز از مرکز تولید شده از جریان گاز رشته‌ای برای جداسازی ذرات از گاز حامل آن‌ها استفاده می‌کنند. طراحی ساده، سرمایه‌ی کم و تعمیر و نگهداری آسان، آن‌ها را برای استفاده به‌عنوان یک دستگاه با ارزش پیش پالایش یا ته‌نشین‌کننده ایده‌آل کرده است. عامل ایجاد حرکت ذرات به سمت دیواره و جدا شدن از فاز سیال، نیروی گریز از مرکز ایجاد شده توسط جریان چرخشی در یک سیکلون می‌باشد. طریق کار سیکلون به‌گونه‌ای است که ذرات درشت‌تر توسط نیروی گریز از مرکز قوی‌تر حرکت کرده و در خروجی پایینی در کف سیکلون جمع می‌شوند. در نقطه مقابل، ذرات ریزتر در جریان سیال باقی مانده و از طریق گردابه‌یاب[۴] از خروجی بالای سیکلون خارج می‌شوند. همواره برای ارزیابی عملکرد یک سیکلون، دو پارامتر بازده جمع‌آوری ذرات و افت فشار مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. پیش‌بینی افت فشار در داخل سیکلون بسیار مهم است، چرا که به‌طور مستقیم با هزینه‌های عملیاتی در ارتباط است. در زمینه‌ی بهبود وضعیت کاری سیکلون‌ها و افزایش کارایی این سیستم‌ها تحقیقات متنوعی در مراکز مختلف تحقیقاتی در حال انجام می‌باشد و محققین با اعمال تغییرات مختلفی که در هندسه و پارامترهای طراحی این سیستم‌ها انجام می‌دهند، روز به‌روز به درک عمیق‌تری از عوامل مؤثر بر کارایی و عملکرد سیکلون‌ها دست پیدا می‌کنند. همان‌طوری که بیان شد، از جمله موارد بسیار مهم در عملکرد یک سیکلون، بازده جداسازی آن است

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳- استاد گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: V.rostampour@urmia.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.2021.67389.1000

4- Vortex finder

که سایر موارد مهم را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد و به‌صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{E_i - E_e}{E_i} \times 100 \qquad (۱)$$

که در آن E_i ذرات جامد در ورودی و E_e ذرات آرد در خروجی سیکلون هستند. محاسبات بر اساس کنترل مقدار ورودی و خروجی ذرات جامد می‌باشد.

دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD[1]) یکی از شناخته‌شده‌ترین و گسترده‌ترین روش مدل‌سازی پیشرفته است که برای انواع کاربردها از جمله انواع فرآیندهای جداسازی، فرآیندهای حرارتی مانند انواع خشک‌کن‌ها و همچنین طیف وسیعی از کاربردهای مهندسی و کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. حل عددی معادلات ناویر- استوکس[2] اساس تمام تکنیک‌های CFD می‌باشد که نتیجه پیشرفت سریع رایانه‌ها و درک بهتر از حل عددی آشفتگی است. با توسعه به این پیشرفت سریع CFD، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی برای پیش‌بینی عملکرد سیکلون توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است. معادلات بقای جرم، مومنتوم (اندازه حرکت) و انرژی در جریان‌های سیال در عبارت‌های معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بیان می‌شود که راه‌حل را با روش‌های تحلیلی ارائه می‌دهد (ANSYS Fluent theory guide, 2013). لازم به ذکر است که برای انجام حل عددی به روش CFD در نرم‌افزار انسیس فلوئنت، به شبکه ایجادشده در یکی از نرم‌افزارهای ایجاد شبکه نیاز است.

مطالعات انجام گرفته در مورد سیکلون‌های جداکننده، تأثیر ابعاد مختلف سیکلون بر بازده جمع‌آوری، افت فشار، ویژگی‌های جریان‌های داخلی و همچنین بحث‌های مربوط به سایش بدنه سیکلون را شامل می‌شود. از اولین کارهای انجام گرفته در این حوزه شامل مطالعه‌ای با موضوع مدل‌سازی تجربی و عددی عملکرد یک سیکلون است (Griffiths and Boysan, 1996). در یک مطالعه تجربی، اثرات طول سیکلون بر عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، نشان داده شده که با افزایش طول سیکلون (تا ۵/۵ برابر قطر سیکلون)، عملکرد سیکلون به‌صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد (Hoffmann *et al.*, 2001). در ادامه گیمبون و همکاران (Gimbun *et al.*, 2005a) مطالعه دیگری در زمینه مطالعه دینامیک سیالات محاسباتی بر بازده جمع‌آوری سیکلون و مباحث مربوط به عملکرد سیکلون انجام دادند. همچنین مطالعه‌ای بر تأثیر قطر نوک مخروط سیکلون بر افت فشار و عملکرد سیکلون‌ها انجام شد و نتیجه گرفته شد که زمانی که قطر نوک مخروط کاهش می‌یابد، افت فشار کل و عملکرد سیکلون افزایش می‌یابد (Gimbun *et al.*, 2005b).

در مطالعه دیگری عملکرد سیکلون‌های تک ورودی رایج با سیکلون‌هایی دارای دو ورودی مقایسه شد و برای حالت با دو ورودی افزایش عملکرد از نظر افزایش بازده جداسازی به‌دست آمد (Zhao *et al.*, 2006). از نقطه نظر تاثیر بهینه‌سازی بر سیکلون‌ها، بهینه‌سازی هندسه سیکلون جداکننده، برای افزایش عملکرد سیکلون از طریق کمینه کردن افت فشار و بالابردن بازده جداسازی، با استفاده از مدل‌های ریاضیاتی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته است (Elsayed and Lacor, 2010). همچنین رضوانی‌وند فنائی و نیکبخت (Rezvanivandefanayi and Nikbakht, 2015) در قالب یک مطالعه عددی، تأثیر قطر ذرات خوراک بر اندازه سرعت و افت فشار در داخل یک سیکلون جداکننده را مورد بررسی قرار دادند. ال احمدی و نواکوفسکی (Alahmadi and Nowakowski, 2016) یک رویکرد شبیه‌سازی عددی با استفاده از یک مدل تلاطم ویسکوزیته گردابی پیشنهاد کردند که اثرات انحنای ساده و چرخش را حساب می‌کند. در این رویکرد، مدل آشفته تنش برشی انتقالی (SST) با استفاده از عدد ریچاردسون محاسبه شده برای اثرات چرخش و انحنا، اصلاح شد. پیش‌بینی‌های عددی با استفاده از نتایج تجربی اعتبارسنجی شده و با داده‌های به‌دست آمده از سایر مدل‌ها مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل تنش‌های رینولدز از نظر دقت و همچنین هزینه محاسباتی، عملکرد بهتری دارد.

مازیان و همکاران (Mazyan *et al.*, 2018) مطالعه‌ای در مورد افزایش عملکرد جداسازی ذرات جامد سیکلون بر اساس اصلاح هندسی سیکلون و با اضافه کردن یک محفظه مماسی به بخش مخروطی سیکلون انجام دادند و دریافتند که افزایش سرعت ورودی بازده جداسازی را افزایش می‌دهد و برای طراحی با یک محفظه مماسی افزایش سرعت ورودی از ۱۴ $m.s^{-1}$ به ۲۰ $m.s^{-1}$ باعث افزایش بازده جداسازی می‌شود. نعیمی و همکاران (Naimi *et al.*, 2019) در مطالعه دیگری به‌صورت تجربی و عددی، جداسازی گندم با استفاده از سیکلون استرماند بازده بالا را مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آن‌ها که در ۶ سرعت مختلف ورودی مواد (۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ متر بر ثانیه) و همچنین ۳ دبی جرمی مختلف (۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ کیلوگرم بر ثانیه) انجام شد، مشخصات داخل سیکلون از جمله بازده جداسازی، افت فشار، میدان سرعت، پارامترهای آشفتگی و سایش به‌صورت کامل مورد بررسی قرار گرفت و سرعت ۱۶ متر بر ثانیه به‌عنوان بهترین سرعت ورودی انتخاب شد. در یک طرح

1- Computational Fluid Dynamics
2- Navier-Stokes

نوآورانه، اثر تیغه منحرف‌کننده جریان بر ویژگی‌های جریان در یک سامانه ثقلی جداسازی نخود به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی مطالعه گردید. برای مدل‌سازی آشفتگی‌های داخل محفظه ته‌نشینی از مدل k-ε استاندارد استفاده گردید. بررسی‌ها نشان داد که مدل آشفته k-ε استاندارد، از توانایی بالایی برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در جداکننده‌های ثقلی برخوردار است استفاده از این تیغه باعث افزایش ۱۱/۴ درصدی بازده ته‌نشینی و همچنین کاهش ۶/۶۷ درصدی جریان هوای مورد نیاز در سیستم و کاهش میزان سایش شد (Zobeiri *et al.*, 2019).

تمرکز اصلی مطالعات انجام گرفته در زمینه سیکلون‌ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بر روی پارامترهای ورودی و هندسی مختلف از جمله سرعت و دبی، تأثیر ابعاد ورودی، ارتفاع بخش‌های مختلف سیکلون، قطر بخش استوانه‌ای، قطر بخش خارجی، وضعیت‌های مختلف قرارگیری گردابه‌یاب، و ارائه‌ی روش‌های بهینه‌سازی برای کمینه کردن افت فشار متمرکز شده است. طبق بررسی‌های انجام شده تاکنون مطالعه‌ای در مورد تأثیر صفحه تنظیم‌کننده جریان خروجی بر فعل و انفعالات اتفاق افتاده در داخل سیکلون، افت فشار، بازده جمع‌آوری و هم‌چنین پارامترهای آشفتگی و غیره انجام نشده است.

بنابراین هدف از پژوهش حاضر به‌دست آوردن تأثیر زوایای مختلف صفحه خروجی جریان گاز بر پارامترهای عملکردی سیکلون از جمله افت فشار، بازده جمع‌آوری و همچنین بدست آوردن بهترین زاویه صفحه خروجی به‌منظور حصول بالاترین بازده جداسازی و کم‌ترین افت فشار در جهت ایجاد مصالحه بین این دو کمیت اساسی (افت فشار و بازده جمع‌آوری) در بررسی عملکرد سیکلون است.

مواد و روش‌ها

برای به‌دست آوردن داده‌های تجربی به‌منظور اعتبارسنجی نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی، از سیستم نشان داده شده در شکل ۱ استفاده گردید. این سیستم شامل سیکلون جداکننده استرماند، تغذیه‌کننده مواد، لوله‌های پایپینگ[1] و فن می‌باشد. اندازه‌گیری‌های سرعت و فشار به‌ترتیب با استفاده از یک سرعت‌سنج هوای سیم داغ (مدل TSI -8465) با رزولوشن $۰/۰۷\ m.s^{-1}$ و محدوده کاری ۰/۱۲۵ تا $۵۰\ m.s^{-1}$) و همچنین یک اختلاف فشارسنج (مدل CPE310s- KIMO، با دقت ۰/۱ پاسکال) انجام گرفت. برای بررسی اثر صفحه تنظیم‌کننده جریان خروجی بر عملکرد سیکلون و مطالعه الگوی جریان در داخل آن، ۵ وضعیت مختلف علاوه بر حالت پایه (زاویه صفر درجه یا کاملاً باز) شامل زوایای ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه توسط اهرم مربوطه ایجاد گردید و پارامترهای سرعت و فشار در این ۶ وضعیت اندازه‌گیری شد. از مقادیر اندازه‌گیری سرعت در زوایای صفحه مختلف برای اعمال شرایط مرزی مربوط به شبیه‌سازی‌ها استفاده گردید. شکل ۲ به همراه جدول ۱ به‌ترتیب شماتیکی از سیکلون مورد استفاده در آزمایش‌ها را به همراه اندازه‌های بخش‌های مختلف آن نشان می‌دهند.

مدل عددی و معادلات حاکم

قوانین حاکم بر جریان‌ها و هندسه‌های مختلف در CFD، قانون بقای جرم، قانون بقای تکانه و قانون بقای انرژی را شامل می‌گردد. در این مطالعه، قوانین بقا برای جریان داخلی هم‌دما حل گردید. معادلات بقای جرم و مومنتوم در حالت کلی به‌صورت زیر بیان می‌شوند (ANSYS Fluent theory guide, 2013):

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t}+\nabla.(\rho\vec{v})=S_m \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t}+\nabla.(\rho\vec{v}\vec{v})=-\nabla p+\nabla.(\overline{\overline{\tau}})+\rho\vec{g}+\vec{F} \qquad (۳)$$

که S_m جرم اضافه شده به فاز پیوسته، p فشار استاتیک، $\rho\vec{g}$ نیروی حجمی جاذبه، $\vec{F}$ نیروی حجمی خارجی، $\overline{\overline{\tau}}$ تانسور تنش است و از طریق رابطه (۴) به‌دست می‌آید:

$$\overline{\overline{\tau}}=\mu\left[(\nabla\vec{v}+\nabla\vec{v}^{T})-\frac{2}{3}\nabla.\vec{v}I\right] \qquad (۴)$$

که μ ویسکوزیته مولکولی، I تانسور واحد و عبارت دوم در طرف راست اثر اتساع حجم است.

انتخاب نوع حلگر

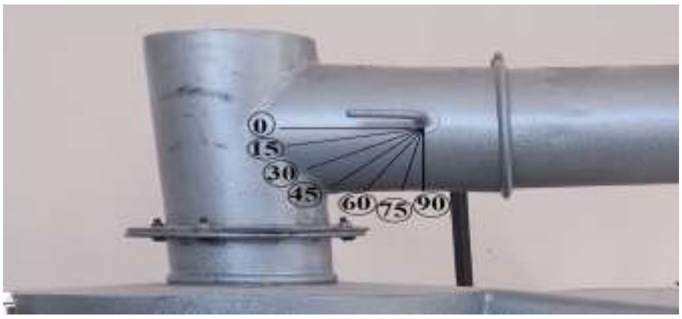
از موارد مهم در یک شبیه‌سازی انتخاب حلگر مناسب می‌باشد. انتخاب نوع حلگر در نرم‌افزار انسیس فلوئنت به عدد بی‌بعد ماخ[2] بستگی دارد. طبق تعریف، عدد ماخ به‌صورت سرعت یک جسم به سرعت صوت تعریف می‌گردد. عدد ماخ بزرگ‌تر از ۰/۳ نشان‌دهنده یک محیط تراکم‌پذیر و عدد ماخ کم‌تر یا برابر ۰/۳ نشان‌دهنده یک محیط تراکم‌ناپذیر است. با توجه به شرایط حل، برای محیط‌های تراکم‌پذیر از حلگر بر پایه چگالی[3] و برای محیط‌های تراکم‌ناپذیر از حلگر بر پایه فشار[4] استفاده می‌گردد. با در نظر گرفتن سرعت جریان ورودی به سیکلون و همچنین عدد ماخ پایین جریان، از حلگر بر پایه فشار بهره برده شده است.

1- Piping tubes

2- Mach Number

3- Density based

4- Pressure based



شکل ۱- ب- زوایای مختلف برای صفحه تنظیم جریان مکشی

Fig.1. b. Various angles for suction flow alignment



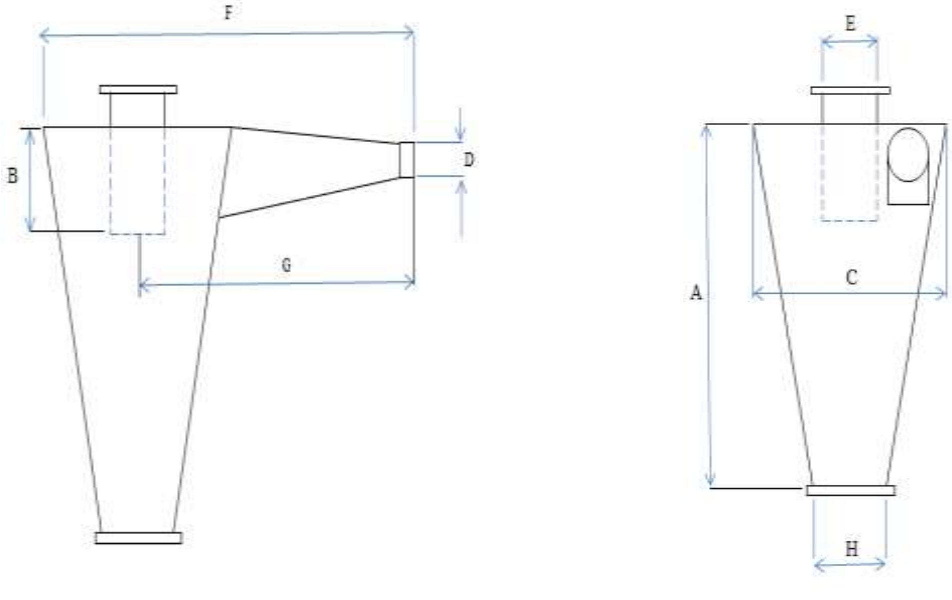
شکل ۱- پ- موقعیت قرارگیری صفحه داخل لوله قسمت خروجی

Fig.1. c. Location of alignment plate inside the outlet pipe



شکل ۱- الف- سیکلون استرماند استفاده شده

Fig.1. a. Stairmand Cyclone used



شکل ۲- سیکلون مورد استفاده

Fig.2. Cyclone used

جدول ۱- اندازه‌های بخش‌های مختلف سیکلون

Table 1- Values of different parts of cyclone

پارامترها Parameters	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)
اندازه Value (cm)	75	18	34	5.6	12	65	48	13.5

مدل‌سازی آشفتگی

مدل آشفتگی به‌منظور مدل‌کردن آشفتگی‌های داخل جریان آشفته مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدودیت‌های مسئله و شرایط خاص آن در انتخاب مدل آشفتگی مناسب حایز اهمیت بسیاری است. در پژوهش حاضر از مدل آشفتگی تنش‌های رینولدز (RSM[۱]) که تنش‌های آیزنتروپیک[۲] آشفته را در نظر می‌گیرد، استفاده شد. مدل RSM به‌صورت رابطه (۵) بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial}{dt}\left(\rho\overline{u_i^{'}u_j^{'}}\right)+\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k u_i^{'}u_j^{'})=D_{ij}+P_{ij}+\prod ij+\varepsilon_{ij}+S \qquad (۵)$$

که دو عبارت سمت چپ به‌ترتیب مشتق زمانی محلی و عبارت انتقال همرفتی هستند. دیفیوژن تنش به‌صورت رابطه (۶) مدل می‌گردد:

$$D_{ij}=-\frac{\partial}{\partial x_k}\overline{\left[\rho u_i^{'}u_j^{'}u_k^{'}+\left(\overline{p^{'}u_j^{'}}\right)\delta_{ik}+\left(\overline{p^{'}u_i^{'}}\right)\delta_{jk}-\mu\left(\frac{\partial}{\partial x_k}\overline{u_i^{'}u_j^{'}}\right)\right]} \qquad (۶)$$

در این رابطه، عبارت تولید تنش به‌صورت رابطه (۷) بیان می‌گردد:

$$p_{ij}=-\rho\left[\overline{u_i^{'}u_k^{'}}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}+\overline{u_j^{'}u_k^{'}}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right] \qquad (۷)$$

عبارت کرنش فشار به‌صورت رابطه (۸) مدل می‌گردد:

$$\prod ij=p\left(\frac{\partial u_i^{'}}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j^{'}}{\partial x_i}\right) \qquad (۸)$$

عبارت تلفات به‌صورت آیزنتروپیک و به‌صورت رابطه (۹) فرض می‌گردد.

$$\varepsilon_{ij}=-2\mu\overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\frac{\partial u_j'}{\partial x_k}} \qquad (۹)$$

و در انتها S که عبارت چشمه یا منبع است.

مدل فاز گسسته[۳] (DPM)

در مدل فاز گسسته (مدل چندفازی رویکرد لاگرانژی[۴]) فاز سیال با حل معادلات میانگین‌گیری شده زمانی به‌صورت پیوسته حل می‌شود، در حالی که فاز پراکنده با ردیابی تعداد زیادی از ذرات از طریق میدان جریان محاسبه می‌گردد. فاز پراکنده قابلیت این را دارد که جرم، مومنتوم و انرژی را با فاز سیال تبادل نماید.

یک فرض اساسی موجود در این رویکرد این است که فاز دوم پراکنده یک کسر حجمی پایین (معمولاً کمتر از ۱۲ درصد، که درصد حجمی نسبت بین حجم کل ذرات و حجم ناحیه سیال است) می‌باشد. مسیرهای ذرات به‌صورت جداگانه در فواصل مشخص شده در محاسبه فاز سیال محاسبه می‌شوند. لازم به‌ذکر است که برای مدل‌سازی جریان‌های ذره‌ای مناسب است. برای مدل‌سازی سیکلون‌های با بارگذاری شدید، تعاملات ذره با ذره و آشفتگی ذرات باید در نظر گرفته شود. از نظر رویکرد لاگرانژی، معادله حرکت ذره در راستای i توسط رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) بیان می‌گردد (ANSYS Fluent theory guide, 2013):

$$\frac{du_{pi}}{dt}=\frac{18\mu}{d_p^2\rho_p}C_d\frac{\mathrm{Re}_p}{24}(\mathrm{u}_i-\mathrm{u}_{pi})+\frac{g_i(\rho_p-\rho)}{\rho_p} \qquad (۱۰)$$

$$\frac{dx_{pi}}{dt}=u_{pi} \qquad (۱۱)$$

که عبارت $F_k=\frac{18\mu}{d_p^2\rho_p}C_d\frac{\mathrm{Re}}{24}$ برابر با نیروی درگ بر واحد جرم ذره، ρ چگالی گاز ($kg.m^{-3}$) و μ ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s) هستند، همچنین C_d ضریب درگ، u_i و u_{pi} به‌ترتیب سرعت گاز و ذره ($m.s^{-1}$) در راستای *i* می‌باشند. g_i شتاب جاذبه در راستای *i* و Re_p عدد رینولدز نسبی است که به‌صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود:

$$\mathrm{Re}_p=\frac{\rho d_p\left|u_g-u_p\right|}{\mu} \qquad (۱۲)$$

ضریب درگ[۵] برای ذرات کروی با استفاده از همبستگی‌های توسعه‌یافته محاسبه می‌گردد. معادله حرکت برای ذرات در امتداد مسیر یک ذره منفرد انتگرال‌گیری می‌گردد. همچنین برخوردهای بین ذرات و دیواره‌های سیکلون به‌صورت الاستیک کامل فرض می‌گردد. فاز پیوسته شامل هوا با چگالی $۱/۲۲۵\ kg.m^{-3}$، ویسکوزیته دینامیکی $۱/۸\times ۱۰^{-5}$ Pa.s و فاز گسسته شامل ذرات آرد می‌باشد. لازم به ذکر است که بازده جمع‌آوری با رها کردن تعداد مشخصی از ذرات گسسته از ورودی سیکلون و نظارت بر تعداد خارج شده از طریق خروجی پایینی حاصل می‌شود. طبق دسته‌بندی گلدارت ذرات جامد آرد با توجه به متوسط قطر (۱۰۰ میکرومتر) در دسته B قرار می‌گیرد.

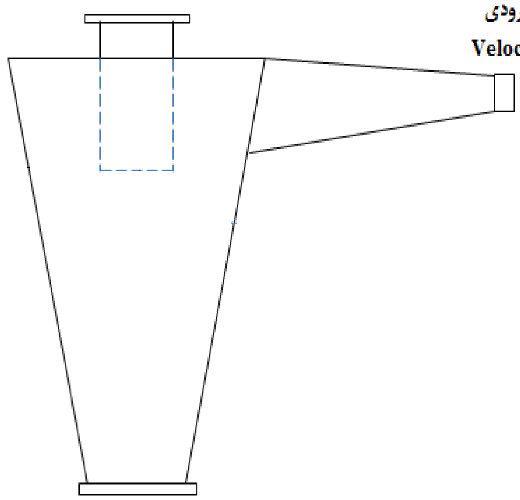
شرایط مرزی مورد استفاده

شرایط مرزی استفاده شده در این مطالعه، شامل شرط مرزی سرعت در ورودی سیکلون، شرط مرزی فشار خروجی در دو بخش خروجی بالا و پایین و شرط مرزی دیواره بدون لغزش برای سایر

1- Reynolds Stress Model
2- Isentropic
3- Discrete Phase Model
4- Lagrangian approach

5- Drag coefficient

سطوح است. همچنین برخورد ذرات به دیواره به‌صورت بازگشتی تعریف گردید. نوع شرایط مرزی و همچنین مقادیر آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است که تعریف بهترین نوع شرط مرزی دارای اهمیت زیادی برای حل صحیح مسئله می‌باشد. شرایط مرزی مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی
Fig. 3. Boundary condition used in simulation

مسئله به‌صورت پایا حل شد. با توجه به این که نمودار باقی‌مانده مربوط به پیوستگی بعد از شروع حل و با مقدار پیش‌فرض (مقدار ضریب ۱) دارای نوسان بود، لذا برای کاهش نوسانات، ضریب مربوط به چگالی به ۰/۸ کاهش یافته و نمودار باقی‌مانده پیوستگی به زیر معیار همگرایی یعنی 10^{-4} رسید. از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم پیشرو استفاده شد. همچنین کوپلینگ سرعت و فشار با استفاده از اسکیم SIMPLE[1] انجام گرفت. لازم به ذکر است که برای شبیه‌سازی‌ها از یک رایانه با پردازشگر Intel core i5 و حافظه رم ۱۶ مگابایت استفاده گردید.

آزمون استقلال از شبکه

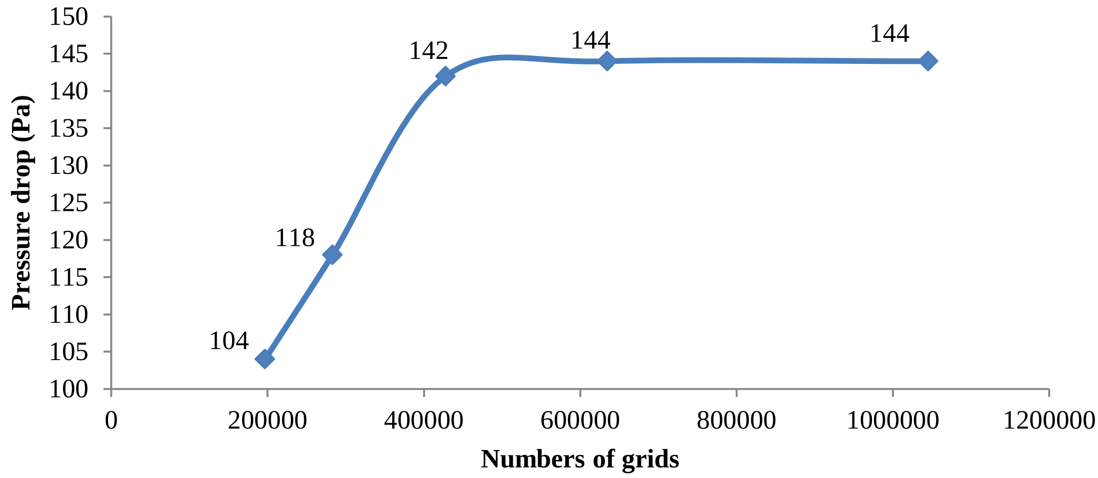
در بخش مربوط به ایجاد شبکه مدل هندسی برای شبیه‌سازی سیکلون از پنج سطح شبکه برای آزمون استقلال شبکه بهره گرفته شد. تعداد سلول‌های شبکه در پنج سطح ۱۹۶۸۱۰، ۲۸۳۱۲۰، ۴۲۷۸۹۰، ۶۳۴۹۴۰ و ۱۰۴۵۲۹۰ عدد بودند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد (شکل ۴) که تفاوت بین افت فشار بین ورودی گاز و خروجی گرداب‌یاب در بین سطوح شبکه‌بندی سوم و چهارم (به‌ترتیب ۴۲۷۸۹۰ عدد و ۶۳۴۹۴۰ عدد شبکه) کم‌تر از ۲٪ بود. بنابراین، برای صرفه‌جویی‌های زمانی در حل، شبکه با تعداد ۴۲۷۸۹۰ عدد به‌عنوان شبکه پایه در این مطالعه استفاده گردید.

شبکه‌بندی (مش‌بندی) انجام شده سیکلون به کمک نرم‌افزار گمبیت ۲،۴،۶ انجام شد که شماتیکی از آن در شکل ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است، برای شبکه‌بندی هندسه از شبکه‌بندی ترکیبی با سازمان استفاده شد، همچنین مقادیر مربوط به کیفیت مش در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- شرایط مرزی
Table 2- Boundary conditions

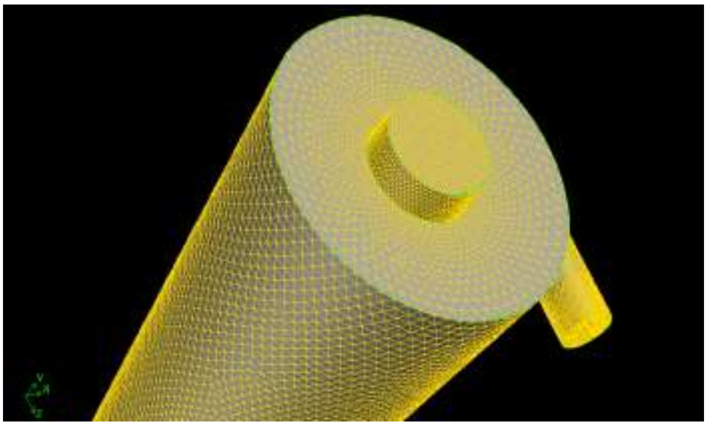
نوع شرط مرزی **Type of boundary condition**	مقدار یا حالت **Value/ Condition**
سرعت ورودی Inlet velocity	10 $m.s^{-1}$
فشار خروجی Outlet pressure	فشار اتمسفر Atmospheric pressure
دیواره Wall	شرایط بدون لغزش No slip condition

1- Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation



شکل ٤– آزمون استقلال از شبکه

Fig. 4. Mesh independency test



شکل ۵– شبکه‌بندی سیکلون در نرم‌افزار گمبیت ۲٫۴٫۶

Fig.5. Meshing of cyclone in Gambit 2.4.6

جدول ۳– مقادیر کیفیت شبکه

Table 3- Mesh quality values

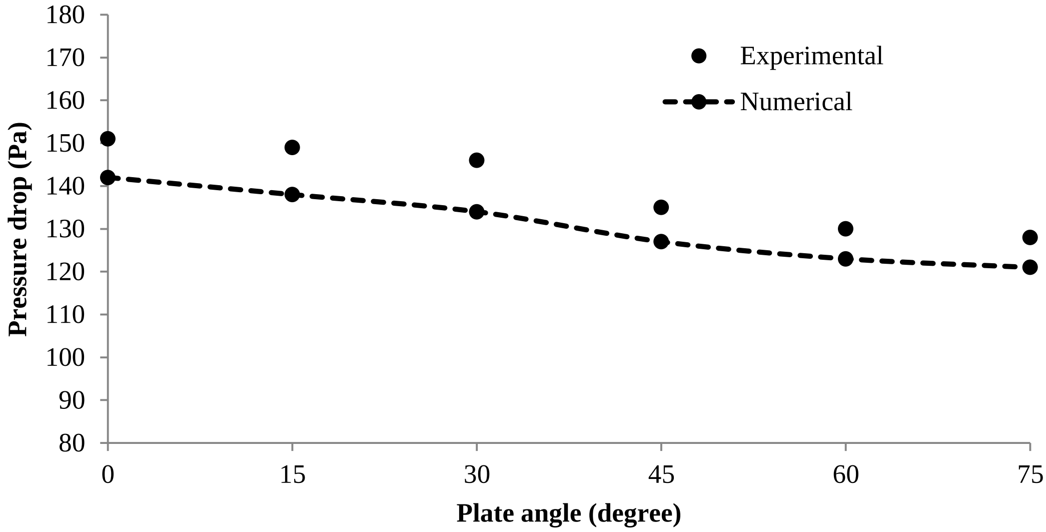
پارامتر کیفیت **Quality parameter**	مقدار **Value**
Maximum aspect ratio	**4.94**
Minimum Orthogonal Quality	**0.84**
Maximum Orthogonal Skewness	**0.19**

نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا به اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نتایج تجربی حاصل پرداخته می‌شود. سپس در ادامه نتایج مربوط به اندازه سرعت، سرعت محوری، بازده جمع‌آوری و افت فشار بحث می‌گردند و در نهایت کانتورهای خط مسیر، شدت آشفتگی و ضریب اصطکاک به‌عنوان پارامترهای با اهمیت در یک سیکلون جداکننده مورد مطالعه می‌گیرند. به‌منظور درک کامل از فرآیند انجام گرفته در هر بخش، برشی از مقطع داخل سیکلون توسط یک صفحه هم به‌صورت عمودی و هم به‌صورت افقی و در کنار همدیگر آورده شده است.

اعتبارسنجی

شبیه‌سازی‌های CFD به‌منظور قابل اعتماد بودن بایستی اعتبارسنجی شوند. برای این منظور از داده‌های مربوط به افت فشار در زوایای مختلف صفحه استفاده گردید. مقادیر افت فشار اندازه‌گیری شده به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در یک سیکلون در زاویه‌های مختلف صفحه از تطابق خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخوردار بودند که این تطابق در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ٦– اعتبارسنجی نتایج تجربی و عددی

Fig.6. Validation of experimental and numerical results

کانتورهای اندازه سرعت و سرعت محوری

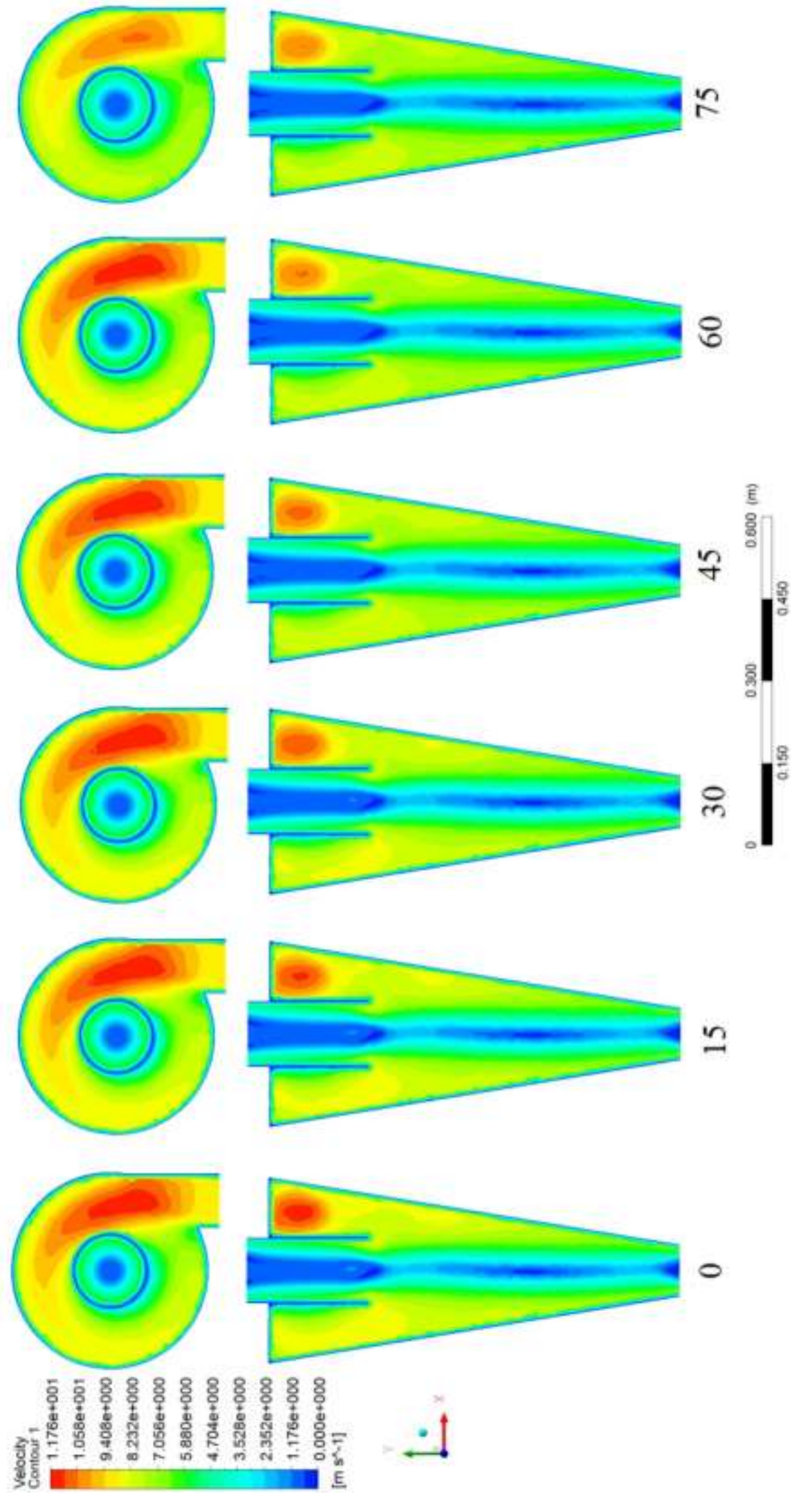
کانتورهای اندازه سرعت به ازای زوایای مختلف صفحه در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، مقدار اندازه سرعت با افزایش زاویه صفحه، روند کاهشی به‌خود گرفته است که احتمالاً به دلیل کاهش سطح خروجی و به تبع آن کاهش دبی هوای خروجی در بخش خروجی هوای سیکلون است که به این صورت خود را نشان داده است. بیش‌ترین مقدار اندازه سرعت ($11/76\ m.s^{-1}$) با توجه به جهت ورودی هوا در ورودی سیکلون ایجاد شده است که رفته‌رفته و با توجه به حرکت چرخشی داخل سیکلون از مقدار آن کاسته شده است. همچنین کم‌ترین مقدار اندازه سرعت محوری به بخش وسط سیکلون و مناطقی که در آن فشار منفی ایجاد می‌گردد تعلق دارد. در کل با توجه به نوع جریان‌یابی مواد در داخل سیکلون، مقدار اندازه سرعت در نزدیکی دیواره‌ها نسبتاً مقدار بالایی داشته و با نزدیک شدن به مرکز سیکلون از مقدار آن کاسته شده است. برش‌های افقی سیکلون که دید از بالا را نشان می‌دهند، به‌خوبی تأثیر بالای زاویه صفحه را بر مقدار و دامنه اندازه سرعت نشان می‌دهد.

در زمینه سرعت محوری و با توجه به ماهیت آن مسئله متفاوت است. بیش‌ترین مقدار سرعت محوری با مقدار $11/76\ m.s^{-1}$ به مناطق نزدیک گردابه‌یاب تعلق دارد. همان‌طوری که از شکل ۸ مشخص است، تغییرات صفحه تأثیر چندانی بر روی الگوی سرعت محوری و همچنان مقادیر آن نداشته است. دلیل این امر را می‌توان به ماهیت سرعت محوری ارتباط داد، چرا که با تغییر زاویه پره بر الگوی محوری جریان اثر چندانی حاصل نمی‌شود. بعد از گردابه‌یاب و تا نزدیکی‌های انتهای بخش مخروطی سرعت محوری دارای روند کاهشی است.

در کار سایر محققین نیز میدان سرعت از موارد حائز اهمیت جهت گزارش عملکرد سیکلون بوده است. مازیان و همکاران (Mazyan *et al.*, 2018) روند تغییرات سرعت داخل سیکلون جداکننده را به ازای تعداد مختلف محفظه‌های مماسی مورد بررسی قرار دادند. در کار آن‌ها افزایش تعداد محفظه مماسی سبب کاهش بیشینه مقدار سرعت شد.

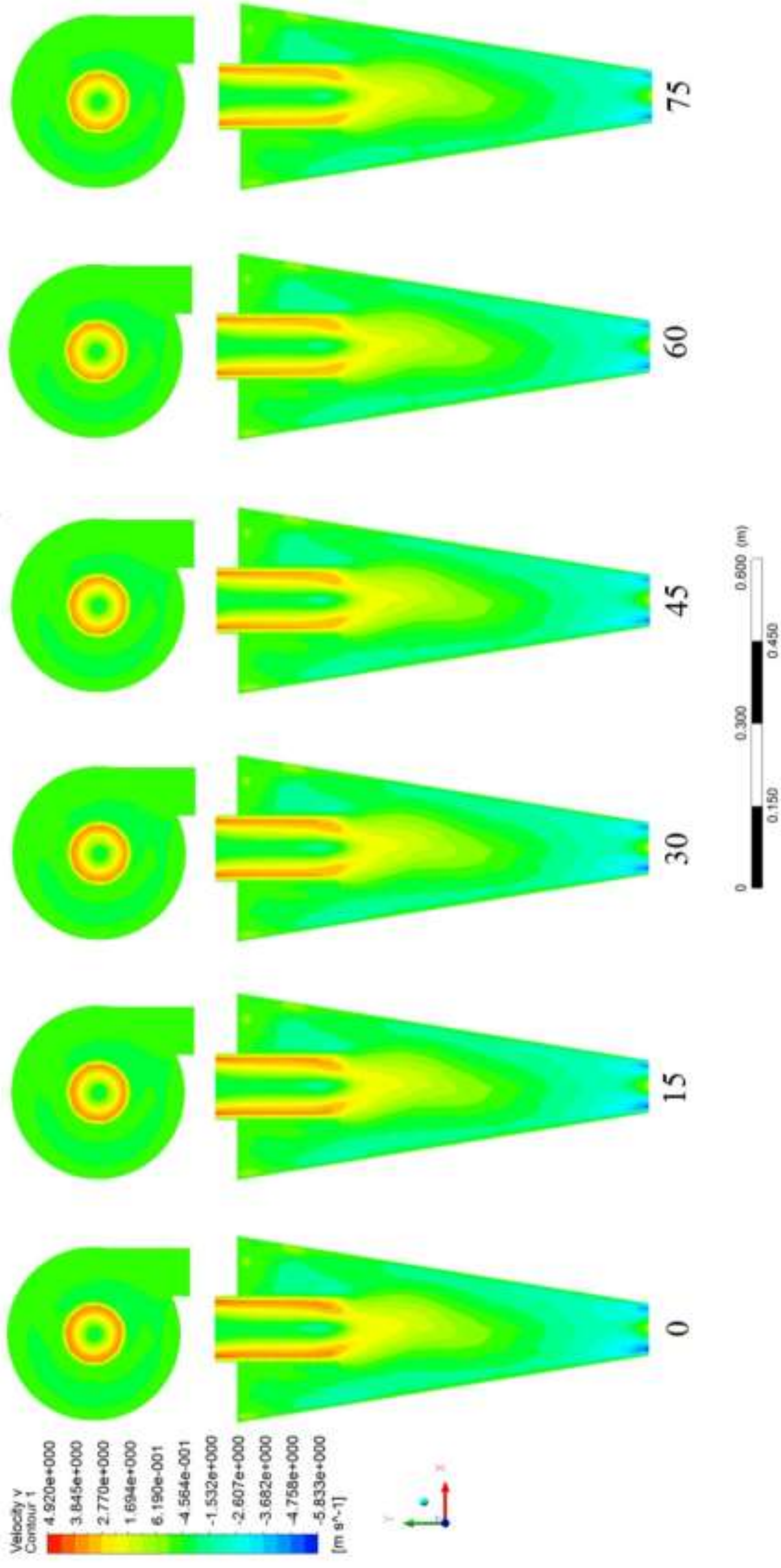
بازده جمع‌آوری

همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد، بازده جمع‌آوری در سیکلون در سطوح مختلف زاویه صفحه خروجی دارای مقادیر ۸۵/۱ درصد تا ۹۵/۳ درصد می‌باشد که بیشینه بازده جمع‌آوری برای زاویه صفحه ۳۰ درجه (۹۵/۳ درصد) و کمینه بازده جمع‌آوری برای زاویه صفحه ۷۵ درجه (۸۵/۱ درصد) به‌دست آمد.



شکل ۷– کانتور اندازه سرعت در زوایای مختلف صفحه تنظیم‌کننده

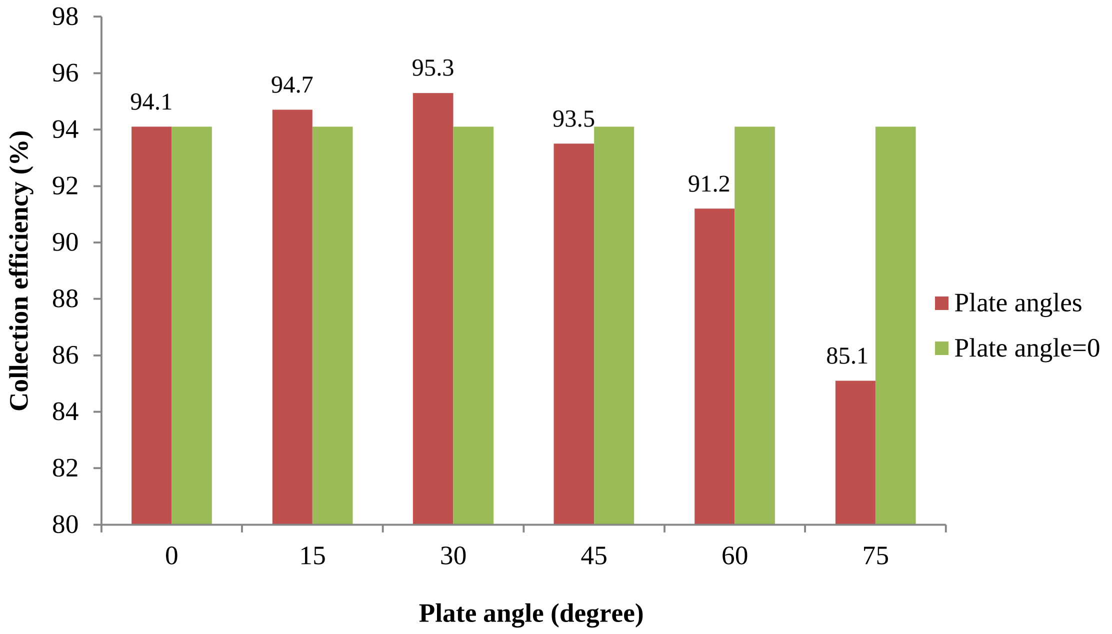
Fig.7. Velocity magnitude contour in various angles of regulator plate



شکل ۸- کانتور سرعت محوری در زوایای مختلف صفحه تنظیم کننده

Fig.8. Axial velocity contour in various angles of regulator plate

به‌منظور مقایسه بازده هر حالت (ستون رنگ قرمز) با حالت پایه (ستون با رنگ سبز)، مقدار بازده حالت پایه در قالب ستون در کنار حالت مورد بررسی به ازای زوایای مختلف صفحه ارائه شده است. روند افزایشی- کاهشی بازه جمع‌آوری، بر اساس زوایای مختلف صفحه تنظیم‌کننده، به علت زاویه خاص در بخش خروجی می‌باشد. در زاویه ۳۰ درجه، بهترین حالت نیروی گریز از مرکز مورد نیاز برای جریان چرخشی ایجاد شده است. چرا که، بازده جمع‌آوری در ارتباط مستقیم با نیروی گریز از مرکز ایجاد شده در بخش گردابه‌یاب سیکلون است. بعد از زاویه ۳۰ درجه به علت ایجاد مانع برای گذر هوای خروجی بازده جمع‌آوری کاهش یافته و در زوایای بیشتر (۶۰ و ۷۵ درجه) افت محسوسی را نشان می‌دهد. در زمینه کارهای انجام گرفته و مرتبط با مطالعه بازده جداسازی، در پژوهش انجام شده توسط السايد و همکاران (۲۰۱۰) نشان داده شد که با افزایش قطر ذرات از محدوده ۰/۱ تا ۱۰ میکرون بازده جداسازی افزایش قابل‌توجهی را از خود نشان می‌دهد (Elsayed and Lacor, 2011).



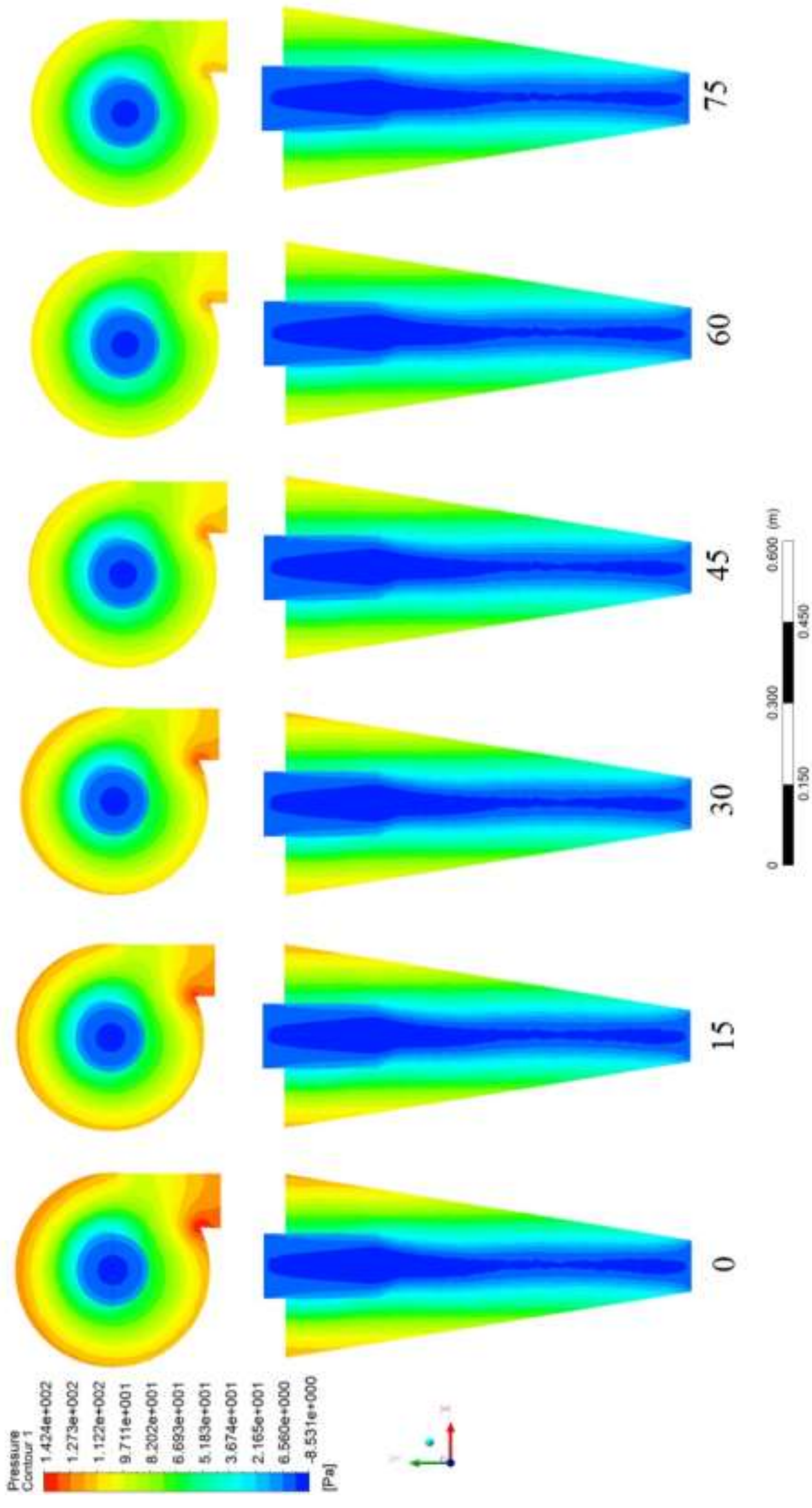
شکل ۹- مقایسه بازده جمع‌آوری در زوایای مختلف صفحه تنظیم‌کننده با حالت بدون زاویه (زاویه صفر)

Fig.9. A comparison of collection Efficiency in regulator plate angles with zero angle situations

افت فشار

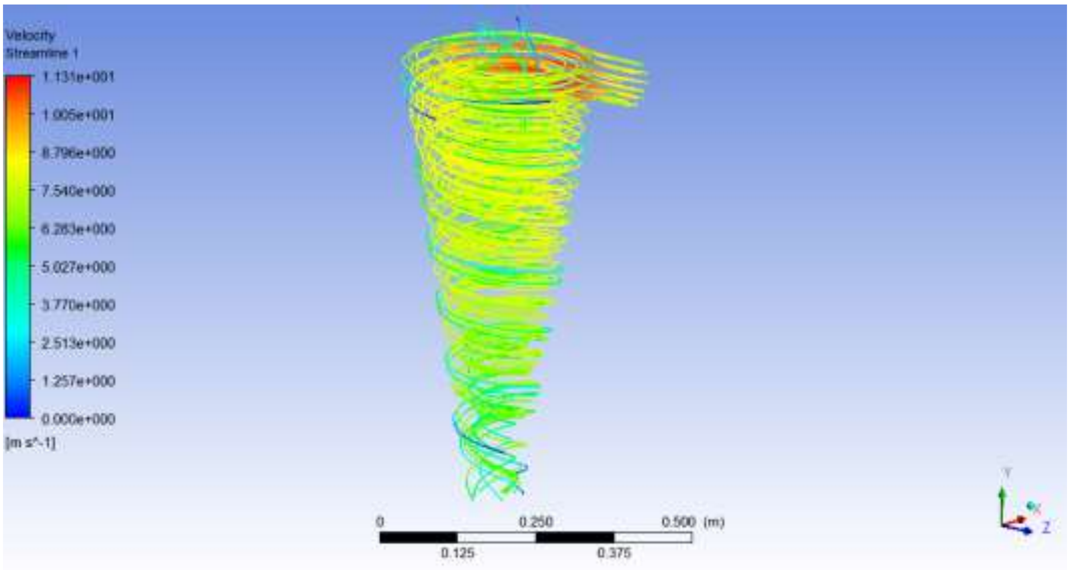
یکی از پارامترهای ارزیابی عملکرد یک سیکلون، افت فشار در داخل آن است. هرچه قدر سیستم دارای افت فشار کم‌تری باشد پایداری بالاتری داشته و از نظر عملکرد دارای ارجحیت است. در شکل ۱۰ کانتورهای فشار استاتیکی به‌ازای زوایای مختلف صفحه تنظیم‌کننده ارائه شده است. با افزایش زاویه صفحه، فشار استاتیکی و در نتیجه افت فشار کاهش یافته است و می‌توان از نقطه نظر افت فشار وجود این صفحه را مثبت ارزیابی کرد. لازم به ذکر است که کم‌ترین افت فشار مربوط به حالت صفحه با زاویه ۷۵ درجه است که مقدار افت فشار در این سطح ۱۱۴ پاسکال می‌باشد.

نکته حایز اهمیت این است که هر دو پارامتر بازده جداسازی و افت فشار بایستی برای به‌دست آوردن ماکزیمم عملکرد مصالحه گردند، لذا با در نظر گرفتن دو پارامتر افت فشار و بازده جداسازی، حالت ۳۰ درجه با توجه به بازده عملکردی ۹۵/۳ درصد (بهترین حالت) و افت فشار ۱۲۶ پاسکال (جزو حالت‌های با افت فشار کم) به‌عنوان بهترین سطح از نظر عملکرد انتخاب گردید. در سایر کارهای انجام شده تغییرات انجام شده بر روی متغیرهای ورودی و یا هندسه سیکلون سبب افزایش یا کاهش افت فشار شده است. به‌عنوان مثال در کار انجام گرفته توسط رضوانی‌وند فنائی و نیکبخت (Rezvanivandefanayi and Nikbakht, 2015) افزایش قطر ذرات خوراک سبب افزایش افت فشار داخل سیکلون شده است. همچنین در تحقیق دیگری که توسط نعیمی و همکاران (Naimi *et al.*, 2019) انجام شده است، افزایش سرعت ورودی رژیم جریان، سبب افزایش افت فشار شده است که مقدار افزایش افت فشار در سرعت‌های بالاتر بیشتر گزارش شده است. روند افزایش افت فشار به‌ازای افزایش سرعت ورودی در کار گیمبون و همکاران (Gimbun *et al.*, 2005) نیز گزارش شده است.



شکل ۱۰- کانتور فشار استاتیکی در زوایای مختلف صفحه تنظیم‌کننده

Fig. 10. Static Pressure contour in various angles of regulator plate



شکل ۱۱- کانتور خط مسیر برای وضعیت زاویه صفحه ۳۰ درجه تنظیم‌کننده

Fig.11. Path line contours in 30˚ angles of regulator plate

خط مسیر

به‌منظور مشاهده هرچه بهتر مسیر حرکت جریان در داخل سیکلون کانتور مربوط به خط مسیر برای حالت صفحه تنظیم‌کننده جریان ۳۰ درجه (بهترین حالت در بین حالت‌های بررسی شده) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌گردد، بعد از ورود جریان به داخل سیکلون از طریق بخش ورودی، جریان به دو بخش شامل بخش خروجی مواد (خروجی پایین) و بخش خروجی گاز (خروجی بالا) تقسیم شده است و عمدتاً از بخش خروجی پایین خارج شده است.

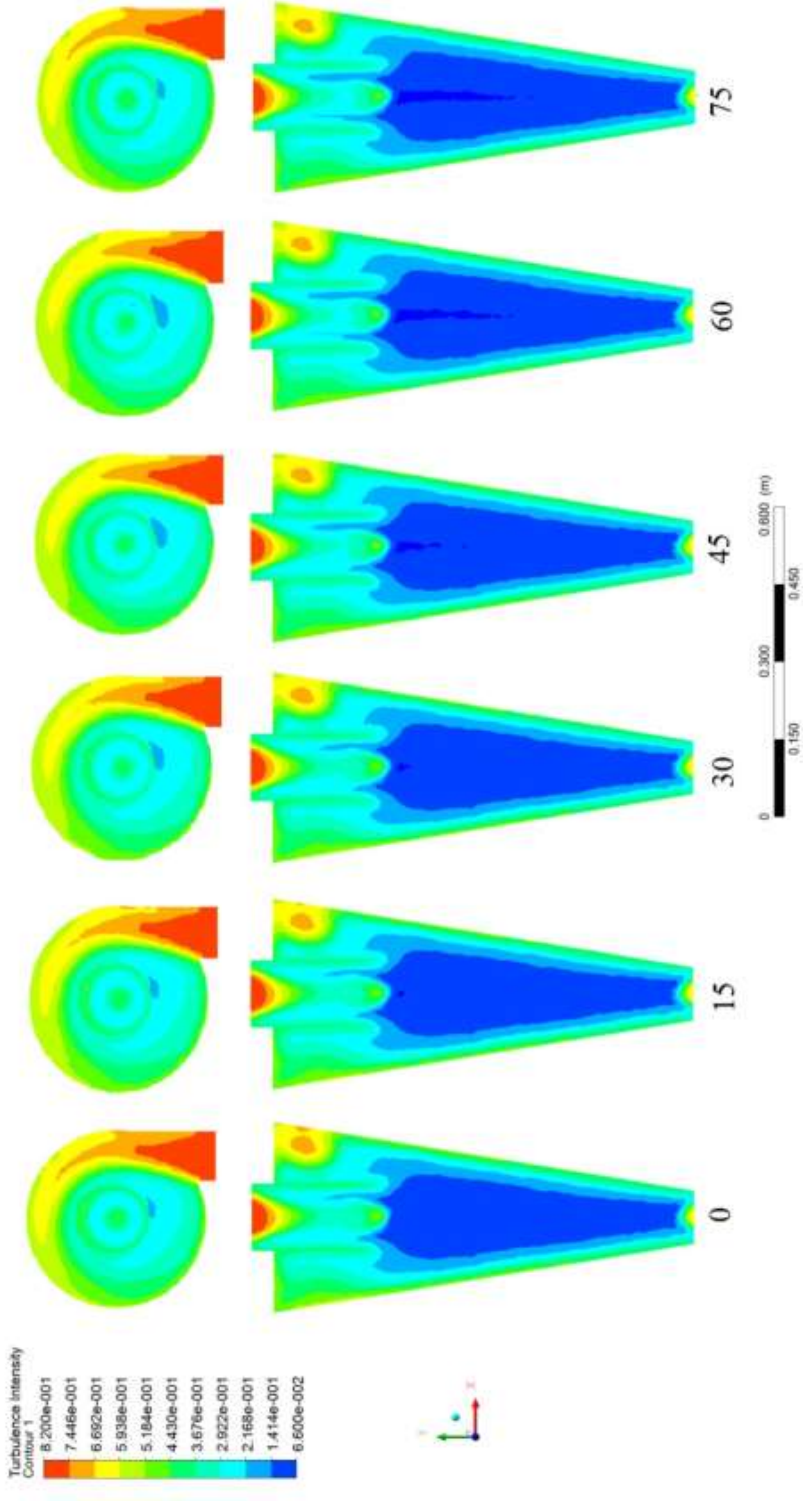
شدت آشفتگی

با در نظر گرفتن تعریف شدت آشفتگی که به‌صورت نسبت انحراف معیار نوسانات سرعت به سرعت میانگین می‌باشد، می‌تواند به‌عنوان معیاری برای شناسایی آشفتگی‌های داخل سیکلون استفاده گردد. لازم به ذکر است که با توجه به کارکرد دائمی سیکلون در مسیرهای فرآوری و کاربردهای صنعتی، آشفتگی‌ها با گذر از حد مشخص می‌توانند به سیستم ارتعاش وارد کرده و سبب ایجاد اختلال در کار سیکلون‌ها و همچنین کار سیستم شوند.

با توجه به شکل ۱۲ که کانتور شدت آشفتگی در زوایای مختلف صفحه تنظیم‌کننده را نشان می‌دهد، شدت آشفتگی تا زاویه ۳۰ درجه کاهش می‌یابد، سپس به مقدار تقریباً ثابت برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه می‌رسد. در ادامه این مقدار برای زاویه صفحه تنظیم‌کننده ۷۵ درجه افزایش می‌یابد که به‌واسطه کاهش مجرای خروجی هوا و آشفته شدن جریان است.

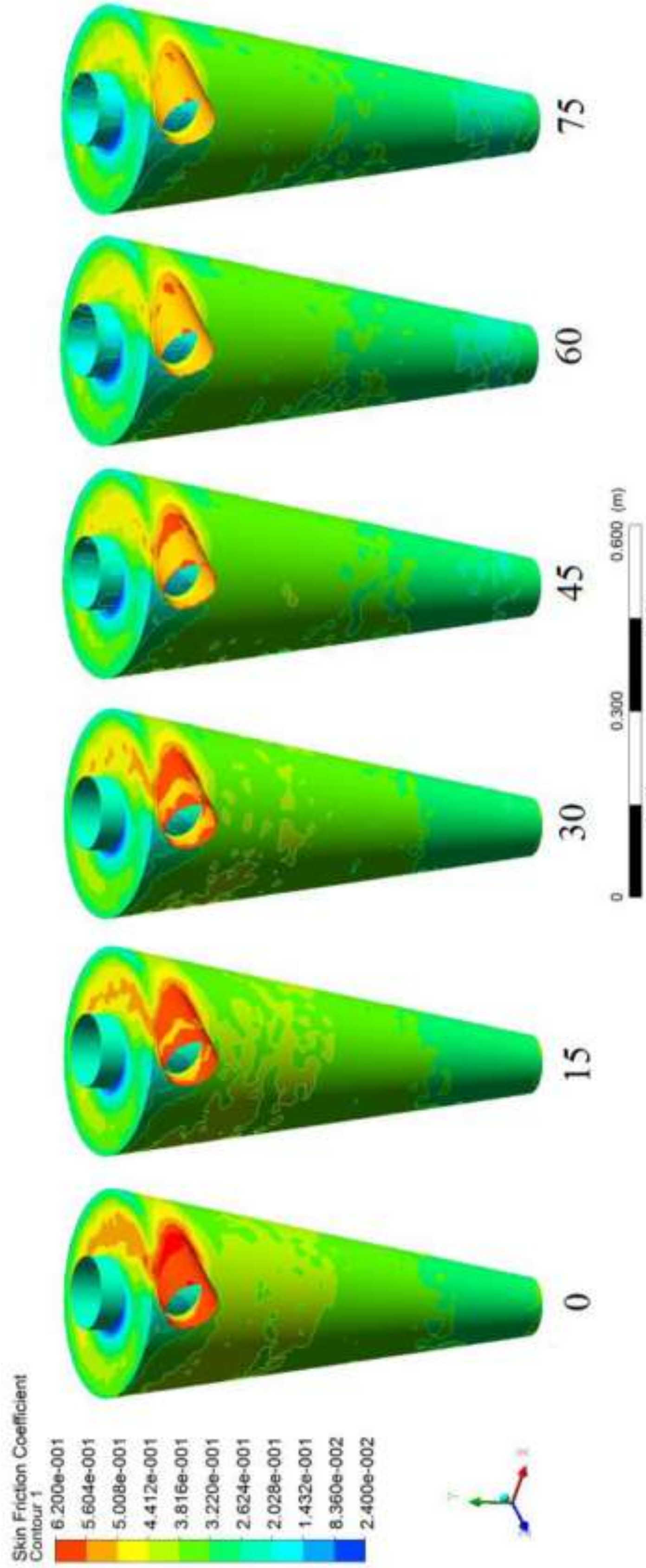
ضریب اصطکاک سطح

در صنایعی همچون صنعت آرد، بحث خوردگی تحت تأثیر اصطکاک ایجاد شده در مقاطع سیکلون یک مشکل اساسی می‌باشد که می‌توان با شناسایی محل‌های ایجاد سایش و اتخاذ روش‌های مناسب لازم هزینه تعویض و نگهداری واحدهای استفاده‌کننده از سیکلون‌ها را تقلیل داد. تحت تأثیر اصطکاک جریان مواد در دیواره سیکلون، خوردگی ایجاد شده و به سبب ورود مماسی مواد و برخورد مستقیم مواد با دیواره در محل ورودی بیشینه مقدار ضریب اصطکاک در بخش ورودی و سطح بالایی قسمت استوانه‌ای مشاهده می‌گردد. شکل ۱۳ روند کاهشی مقدار ضریب اصطکاک سطح را با توجه به افزایش زاویه صفحه تنظیم‌کننده را نشان می‌دهد. دلیل این پدیده (کاهش ضریب اصطکاک سطح) کاهش مجرای خروجی هوا و در نتیجه کم‌تر شدن حجم ورودی و خروجی هواست که سبب ایجاد گرادیان فشاری کم‌تر به‌منظور مکش در خروجی هوا در مرکز سیکلون می‌گردد. در پژوهش انجام شده توسط نعیمی و همکاران (Naimi *et al.*, 2019) افزایش سرعت ورودی مواد، سبب افزایش ضریب اصطکاک در بدنه سیکلون گردیده است.



شکل ۱۲- کانتور شدت آشفتگی در زوایای مختلف صفحه تنظیم‌کننده

Fig.12. Turbulence intensity contour in various angles of regulator plate



شکل ۱۳ – کانتور ضریب اصطکاک سطح در زوایای مختلف صفحه تنظیم‌کننده

Fig. 13. Friction contour in various angles of regulator plate

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر شش زاویه ایجاد شده توسط صفحه تنظیم‌کننده جریان خروجی شامل زوایای صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه بر عملکرد سیکلون جداکننده آرد مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام آزمایش‌های تجربی از یک سرعت‌سنج هوای سیم داغ و یک ابزار اندازه‌گیری اختلاف فشار با دقت ۰/۱ پاسکال استفاده شد. در بخش عددی مدل هندسی سه‌بعدی در نرم‌افزار گمبیت نسخه ۲،۴،۶ رسم گردید و سپس بعد از انجام شبکه‌بندی مناسب و تعریف شرایط مرزی مطلوب، جهت تحلیل و استخراج نتایج به نرم‌افزار انسیس فلوئنت نسخه ۱۵ وارد شد. کانتورهای مربوط به اندازه سرعت، سرعت محوری، بازده جداسازی، افت فشار، خط مسیر، شدت آشفتگی و همچنین ضریب اصطکاک سطح سیکلون برای سطوح مختلف به کمک نرم‌افزار پس از پردازش انسیس فلوئنت (CFD-Post) استخراج شده و مورد بحث قرار گرفتند. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از تحلیل نتایج به شرح زیر است:

۱- با افزایش مقدار زاویه صفحه تنظیم‌کننده جریان خروجی، مقدار اندازه سرعت روند کاهشی محسوسی به‌خود گرفت، منتهی تغییر زاویه تأثیر چندانی را بر روی سرعت مماسی نشان نداد که به‌خاطر نوع قرارگیری صفحه در زاویه‌های مختلف به این صورت درآمده است.

۲- از نظر شدت آشفتگی، این پارامتر تا زاویه صفحه جداکننده ۳۰ درجه روند کاهشی داشت، سپس به مقدار تقریباً ثابت برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه رسید و در انتها برای زاویه صفحه تنظیم‌کننده ۷۵ درجه افزایش یافت. همچنین مقدار ضریب اصطکاک سطح روند کاهشی را با توجه به افزایش زاویه صفحه تنظیم‌کننده نشان داد که به دلیل کاهش مجرای خروجی هوا و در نتیجه کم‌تر شدن حجم ورودی و حجم خروجی هواست. این کاهش حجم هوای خروجی، سبب ایجاد گرادیان فشاری کم‌تر به‌منظور ایجاد مکش در خروجی هوا در مرکز سیکلون می‌شود.

۳- بازده جداسازی روند افزایشی- کاهشی برای مقادیر مختلف صفحه تنظیم‌کننده نشان داد به‌طوری که تا زاویه ۳۰ درجه صفحه اثر مثبت بر روی بازده جداسازی داشت، منتهی بعد از ۳۰ درجه روند کاهشی شده و رفته رفته اثر این تأثیر با شدت بیشتری خود را نشان داد. کم‌ترین میزان بازده جداسازی برای زاویه صفحه ۷۵ درجه به‌دست آمد. همچنین افت فشار با افزایش زاویه صفحه تنظیم‌کننده روند کاهشی را نشان داد که برای عملکرد کلی سیکلون مثبت بود.

۴- در مجموع و با در نظر گرفتن مصالحه بین بازده جداسازی و افت فشار به‌عنوان دو پارامتر تأثیرگذار بر عملکرد سیکلون زاویه ۳۰ درجه به‌عنوان بهترین زاویه در بین زوایای مورد بررسی جهت استفاده انتخاب شد.

References

1. Alahmadi, Y. H., and A. F. Nowakowski. 2016. Modified shear stress transport model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator. Chemical Engineering Science 147: 150-165. https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.03.023.
2. Elsayed, K., and C. Lacor. 2010. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations. Chemical Engineering Science. 65: 6048-6058. https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.08.042.
3. Elsayed, K., and C. Lacor. 2011. The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance. Applied Mathematical Modelling 35: 1952-1968. https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.007.
4. Gimbun, J., T. G. Chuah, T. S. Y. Choong, and A. Fakhru’l-Razi. 2005a. A CFD study on the prediction of cyclone collection efficiency. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics 6 (3): 161-168. DOI: 10.1080/15502280590923649.
5. Gimbun, J., T. G. Chuah, T. S. Y. Choong, and A. Fakhru’l-Razi. 2005b. Prediction of the effects ofcone tip diameter on the cyclone performance. Journal of Aerosol Science 36 (8): 1056-1065. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.10.014.
6. Griffiths, W. D., and F. Boysan. 1996. Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers. Journal of Aerosol Science 27: 281-304. https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)00549-8.
7. Hoffmann, A. C., M. De Groot, W. Peng, H. W. Dries, and J. Kater. 2001. Advantages and risks in increasing cyclone separator length. American Institute of Chemical Engineers Journal 47: 2452-2460. https://doi.org/10.1002/aic.690471109.
8. Inc. ANSYS. 2013. ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 182 15317: 373-464.
9. Mazyan, W. I., A. Ahmadi, J. Brinkerhoff, H. Ahmed, and M. Hoorfar. 2018. Enhancement of Cyclone Solid Particle Separation Performance Based on Geometrical Modification, Numerical Analysis. Separation and Purification Technology 191 (1): 276-285. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.040

10. Naimei Dizajyekan, S., Gh. Shahgholi, A. Rezvanivande fanaei, and V. Rotampour. 2019. Numerical Study of Wheat Conveying in Separator Cyclone Using Computational Fluid Dynamics. Journal of Agricultural Machinery 11 (2): 231-246. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v11i2.79613.
11. Rezvanivandefanayi, A., and A. M. Nikbakht. 2015. A CFD Study of the Effects of Feed Diameter on the Pressure Drop in Acyclone Separator. International Journal of Food Engineering 11: 71-77. https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0125.
12. Zhao, B., Y. Su, and J. Zhang. 2006. Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration. Chemical Engineering Research and Design 84 (12): 1158-1165. https://doi.org/10.1205/cherd06040.
13. Zobeiri, M., V. Rostampour, A. R. Fanaei, and A. M. Nikbakht. 2019. Experimental and Numerical investigation of deviation blade effect on sedimentation chamber performance in chickpea harvesting machine. Iran Biosystems Engineering 52: 329-339. (In Persian). DOI: 10.22059/ijbse.2020.276317.665166.